



Оценка баланса солнечного излучения в мелководном море по спутниковым данным о цвете вод

Вазюля С.В., Копелевич О.В., Шеберстов С.В.

**Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Нахимовский пр., 36, Москва 117997,
e-mail: svershova@mail.ru; тел. (095) 129-2781.**

Содержание

1. Введение
2. Три этапа проведения расчетов:
 - Модифицированный алгоритм атмосферной коррекции
 - Расчет оптических характеристик воды, определяющих распространение ФАР в водной толще
 - Расчет компонентов баланса ФАР на поверхности и в водной толще
3. Примеры расчетов и сравнение с результатами измерений
4. Оценка влияния дна
5. Заключение

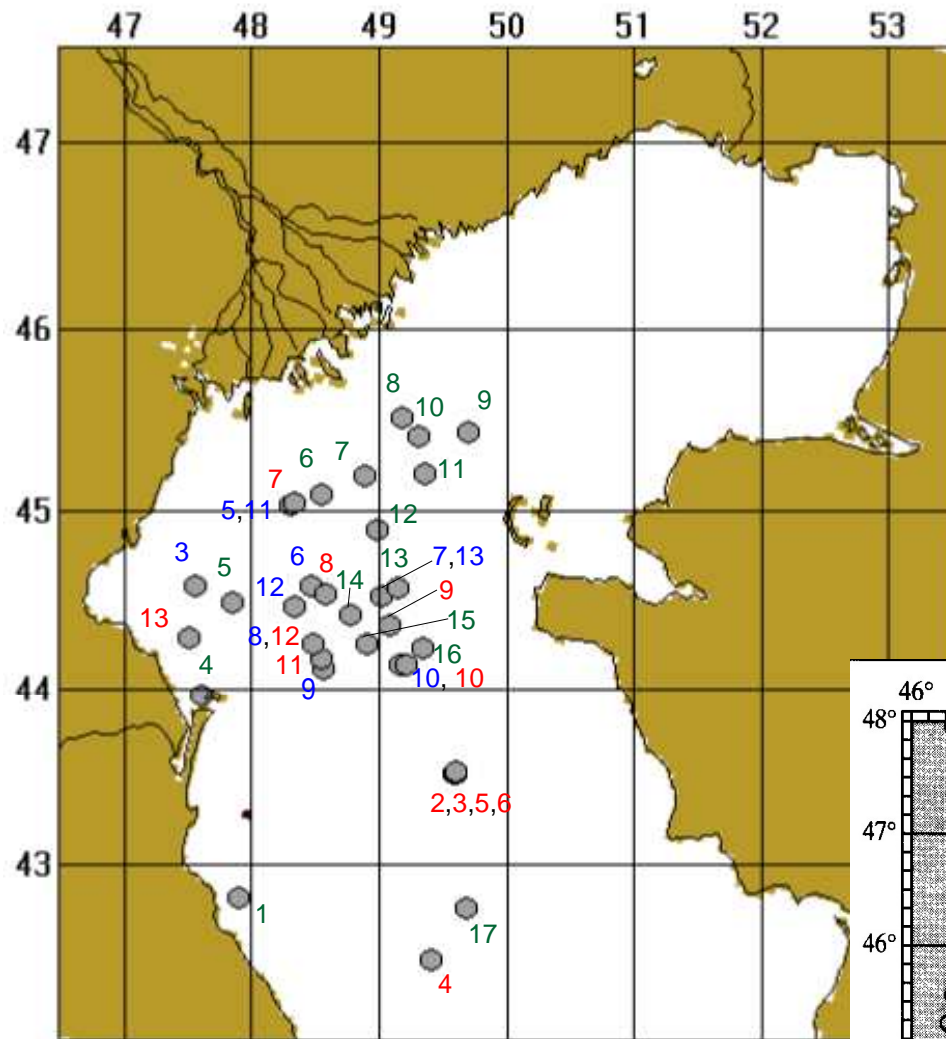
Оценка баланса солнечного излучения (ФАР) в системе атмосфера-океан необходима, так как излучение, поглощаемое океаном, определяет:

- создание первичной продукции фитопланктона
- формирование термической структуры и теплосодержание поверхностного слоя

Использование спутниковых данных – единственная возможность оценки пространственной и временной изменчивости утилизируемой ФАР в зависимости от различных факторов.

Главная особенность мелководного случая – отражение солнечного излучения от морского дна.

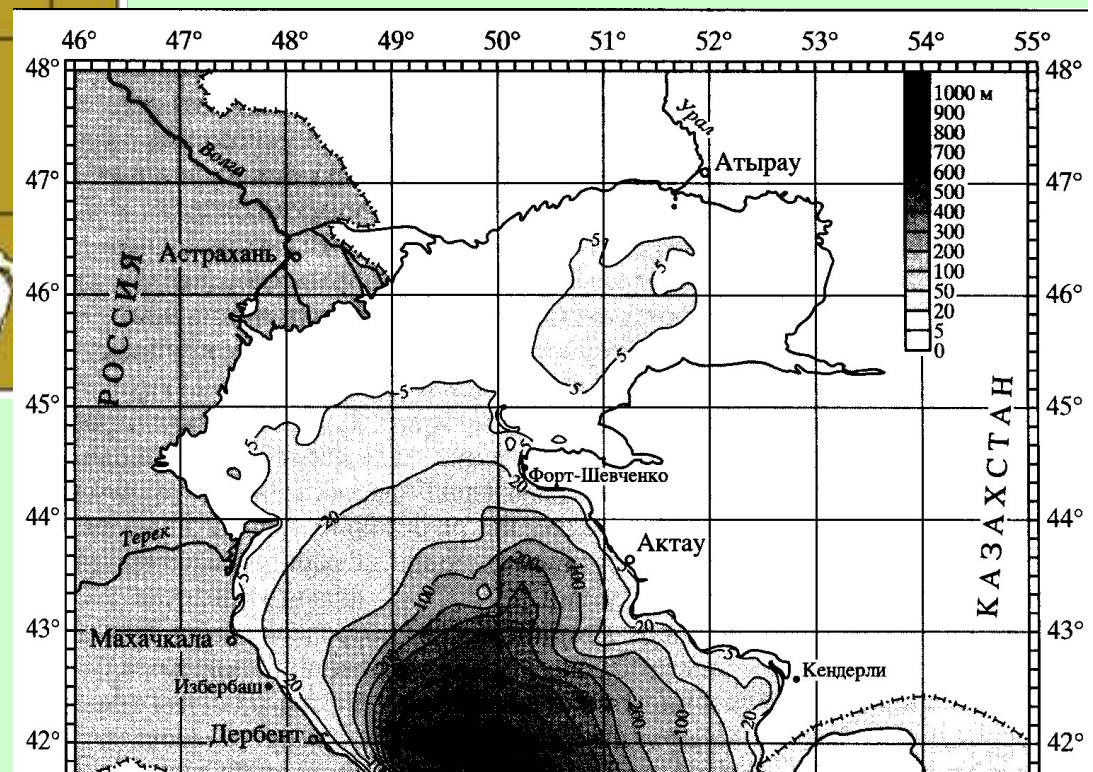
Например, знание баланса на мелководье необходимо, чтобы лучше понять механизм образования термического бара, который возникает в прибрежной области водоемов в период освобождения от ледяного покрова, либо его образования.



Расположение станций.
Синим цветом обозначены
номера станций в 2003 г.,
зеленым – в 2004 г.,
красным – в 2006 г.

В настоящей работе
рассматривается северная часть
Каспийского моря, где глубины
в основном меньше 15 метров.

Батиметрическая карта северной
половины Каспийского моря



Два этапа обработки данных спутниковых сканеров цвета

1. Атмосферная коррекция – определение спектральных значений яркости $L_w(\lambda)$ излучения, вышедшего из водной толщи, по спектральным значениям яркости $L_t(\lambda)$ восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеренным спутниковым датчиком:

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + T(\lambda)L_g(\lambda) + t(\lambda)L_{wc}(\lambda) + t(\lambda)L_w(\lambda),$$

- $L_r(\lambda)$ и $L_a(\lambda)$ – яркости, обусловленные, соответственно, рэлеевским рассеянием и многократным рассеянием аэрозолем;
- $L_g(\lambda)$ и $L_{wc}(\lambda)$ – солнечными бликами и диффузным отражением пеной;
- $T(\lambda)$ и $t(\lambda)$ направленное и диффузное пропускание излучения атмосферой

2. Расчет биооптических параметров воды по спектральным значениям яркости $L_w(\lambda)$ излучения, вышедшего из водной толщи.

Алгоритм атмосферной коррекции ИОРАН

Разработанный в ИОРАН усовершенствованный алгоритм атмосферной коррекции основан на одновременном определении аэрозольного вклада $\rho_a(\lambda)$ и искомого спектрального коэффициента яркости моря $\rho_w(\lambda)$ по измеренным значениям коэффициента яркости $\rho_t(\lambda)$ восходящего излучения на верхней границе атмосферы

$$\rho_t(\lambda) = [\rho_r(\lambda) + T(\lambda) \rho_g(\lambda) + t(\lambda) \rho_{wc}(\lambda)] + \rho_a(\lambda) + t(\lambda) \rho_w(\lambda)$$

Используется параметризация спектральных функций $\rho_a(\lambda)$ и $\rho_w(\lambda)$ посредством нескольких базовых функций. Благодаря этому проблема сводится к нахождению нескольких весовых коэффициентов при этих базовых функциях, исходя из наилучшего соответствия измеренных и рассчитанных спектральных значений $\rho_t(\lambda)$.

Спектральный коэффициент яркости моря $\rho_w(\lambda)$ представляется в виде разложения по разработанной ранее системе базовых функций $\rho_{w1}(\lambda)$, $\rho_{w2}(\lambda)$, $\rho_{w3}(\lambda)$

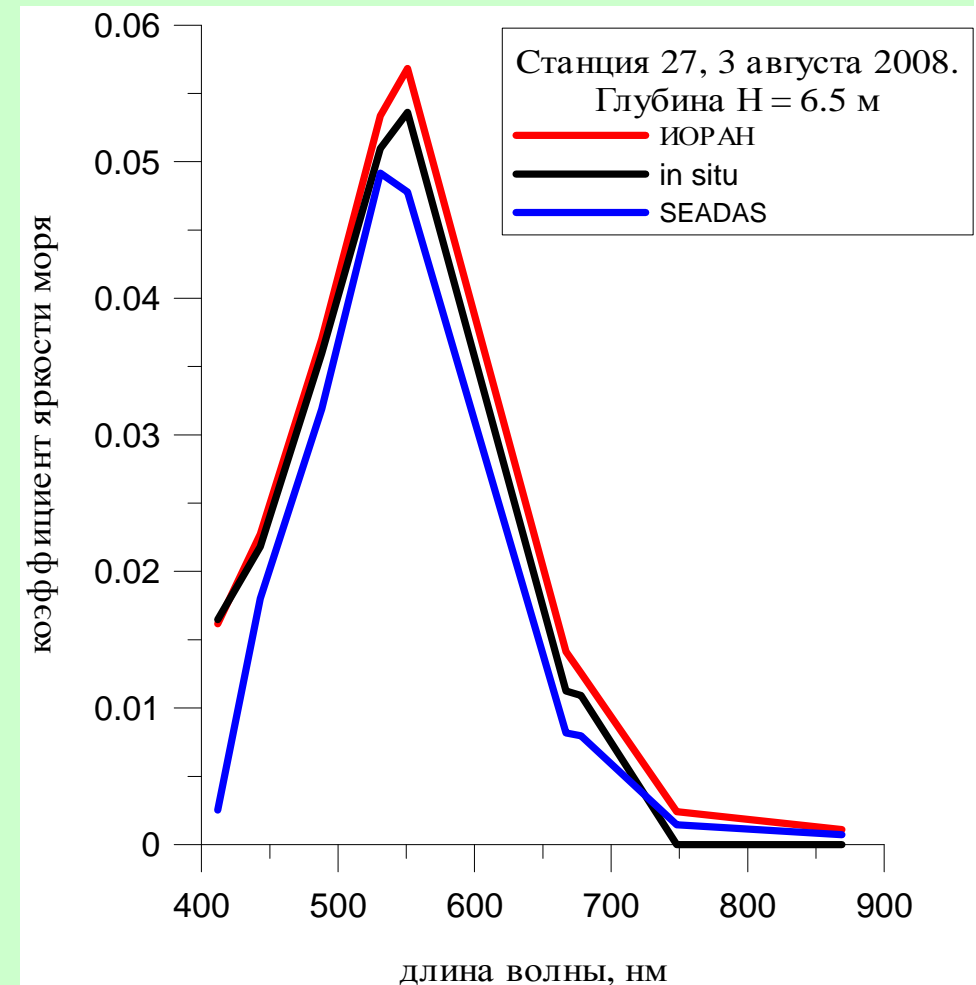
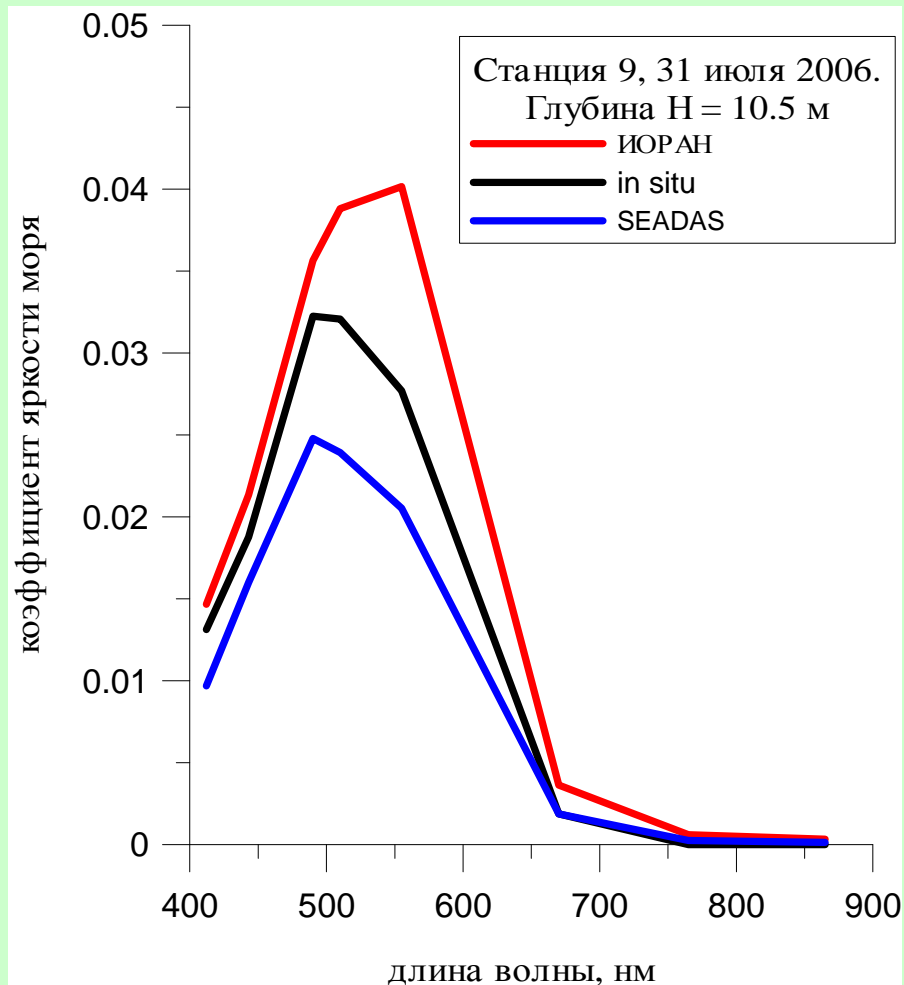
$$\rho_w(\lambda) = c_1 \rho_{w1}(\lambda) + c_2 \rho_{w2}(\lambda) + c_3 \rho_{w3}(\lambda),$$

где c_1 , c_2 , c_3 – искомые коэффициенты разложения (Kopelevich et al. 2007).

Региональный алгоритм атмосферной коррекции для мелкого моря

Буренков В.И., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Прохоренко О.В.

Разработка региональных алгоритмов атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета. – доклад О.В. Копелевича на секции Е.



Обращение спектрального коэффициента яркости моря с учётом отражения от дна

$$\rho_w(\lambda) = \rho_\infty(\lambda) [1 - \exp(-2K_d(\lambda) H)] + \rho_B(\lambda) \exp(-2K_d(\lambda) H),$$

где H – глубина, $\rho_B(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения ото дна, $K_d(\lambda)$ – спектральный показатель диффузного ослабления подводной облученности, $\rho_\infty(\lambda)$ – спектральный коэффициент яркости для бесконечно глубокого океана

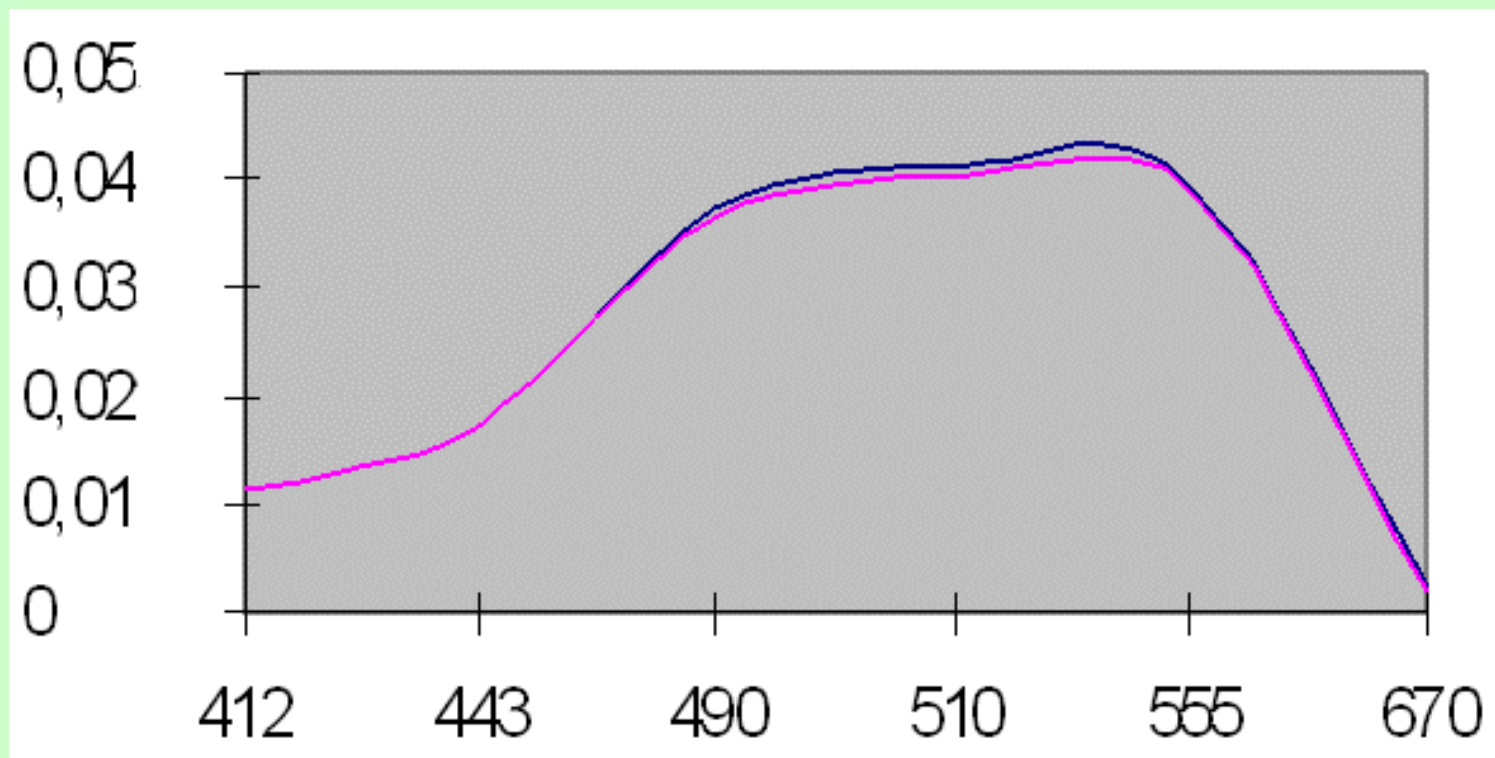
$$K_d = 1.04 D_o (a + b_b), D_o = 1/\cos\theta_w \quad \text{Gordon 1989}$$

$$\rho_\infty = 0.0922 \pi X / (1 - X), \quad \text{Morel, Gentili 1993}$$

$$\text{где } X = b_b / (a + b_b),$$

a и b_b – показатели поглощения и рассеяния назад морской воды.

Оценка точности приближенной формулы (красная) путем сравнения с расчетами точным методом (черная)



Расчеты выполнены для оптических характеристик воды на ст.13 экспедиции 2004 г., глубина 10м. Значение альбедо дна взято для белого песка $R_B = 0.22$. Точность приближенной формулы зависит от оптических характеристик воды: для относительно чистых вод ошибка не превышает 2 %, для более мутных – увеличивается (на краях спектра) до 15 %;

Оптические свойства морской воды и дна

поглощение $a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_g(\lambda) + a_{ph}(\lambda)$

- поглощение РОВ $a_g(\lambda) = \mathbf{a_g} \exp(-S(\lambda - 440))$
- поглощение пигментами $a_{ph}(\lambda) = \mathbf{Chl} A(\lambda) \cdot \mathbf{Chl}^{-B(\lambda)}$

рассеяние назад $b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)$

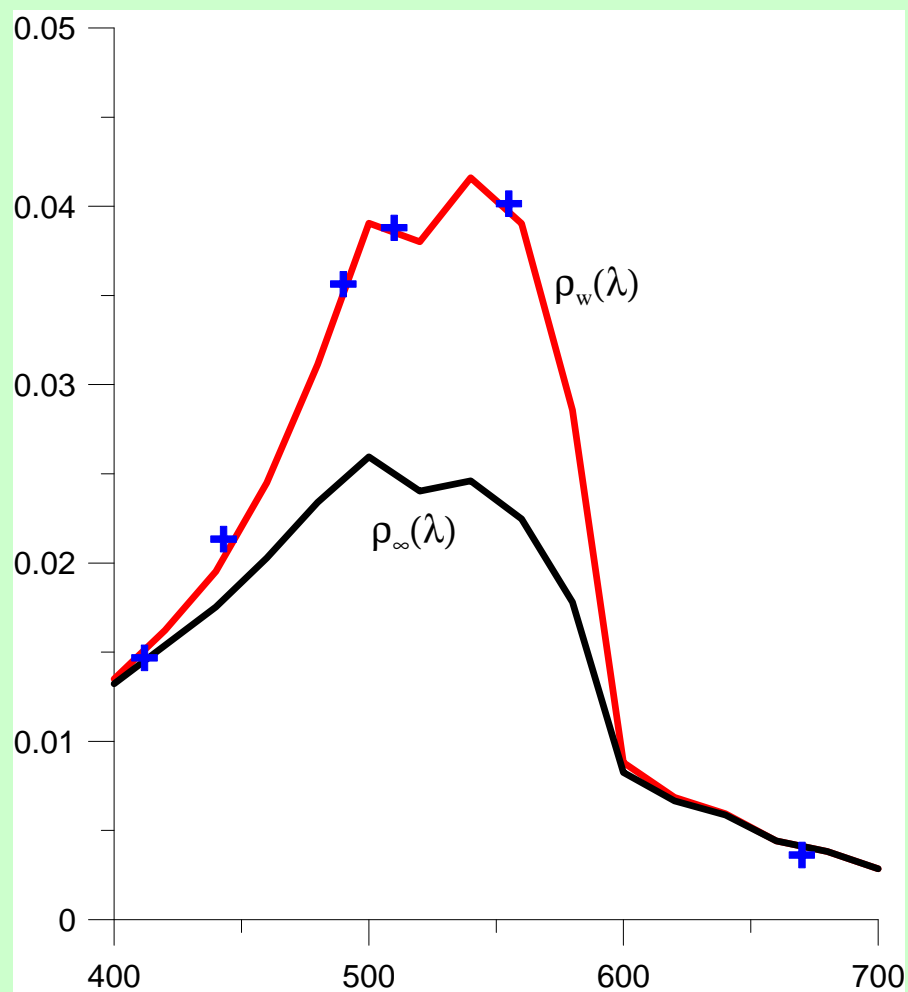
- рассеяния взвесью $b_{bp}(\lambda) = \mathbf{b_{bp}} (\lambda/550)^{-n}$

отражение от дна $\rho_B(\lambda) = \mathbf{A} f(\lambda)$

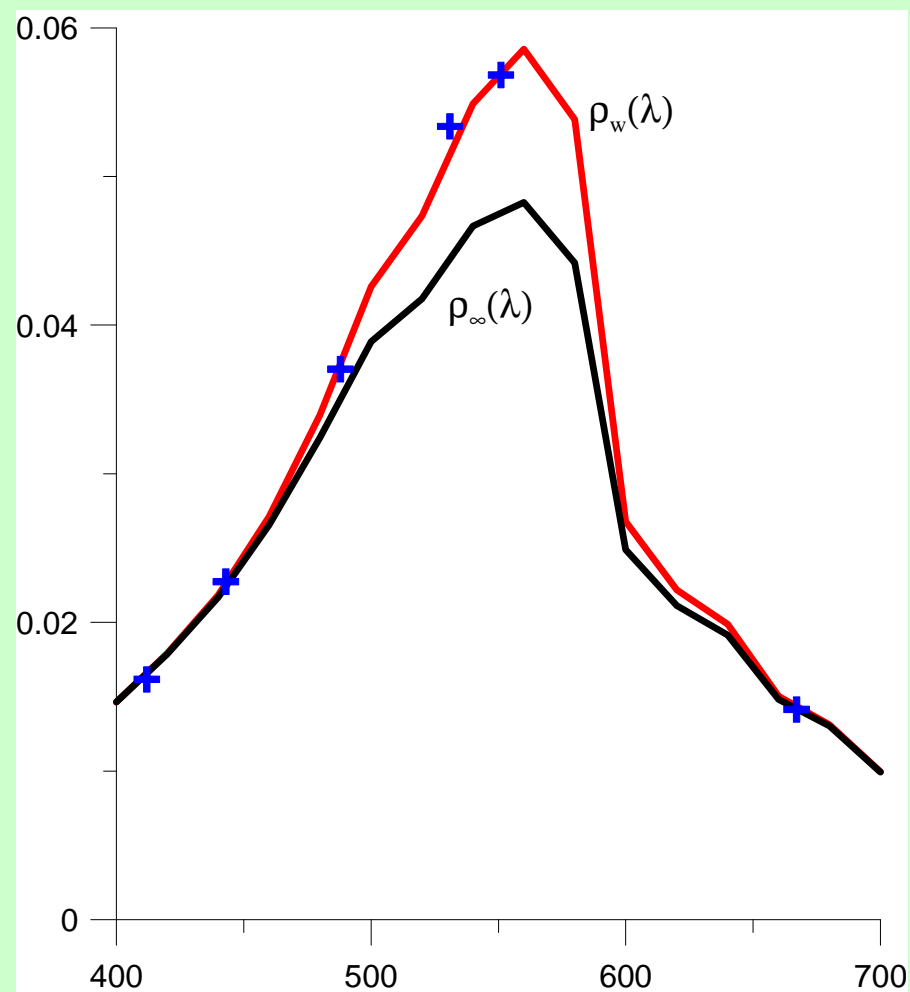
Четыре неизвестных параметра:

\mathbf{Chl} , $\mathbf{a_g}$, $\mathbf{b_{bp}}$, \mathbf{A}

Результаты обращения спектрального коэффициента яркости моря с учётом отражения от дна



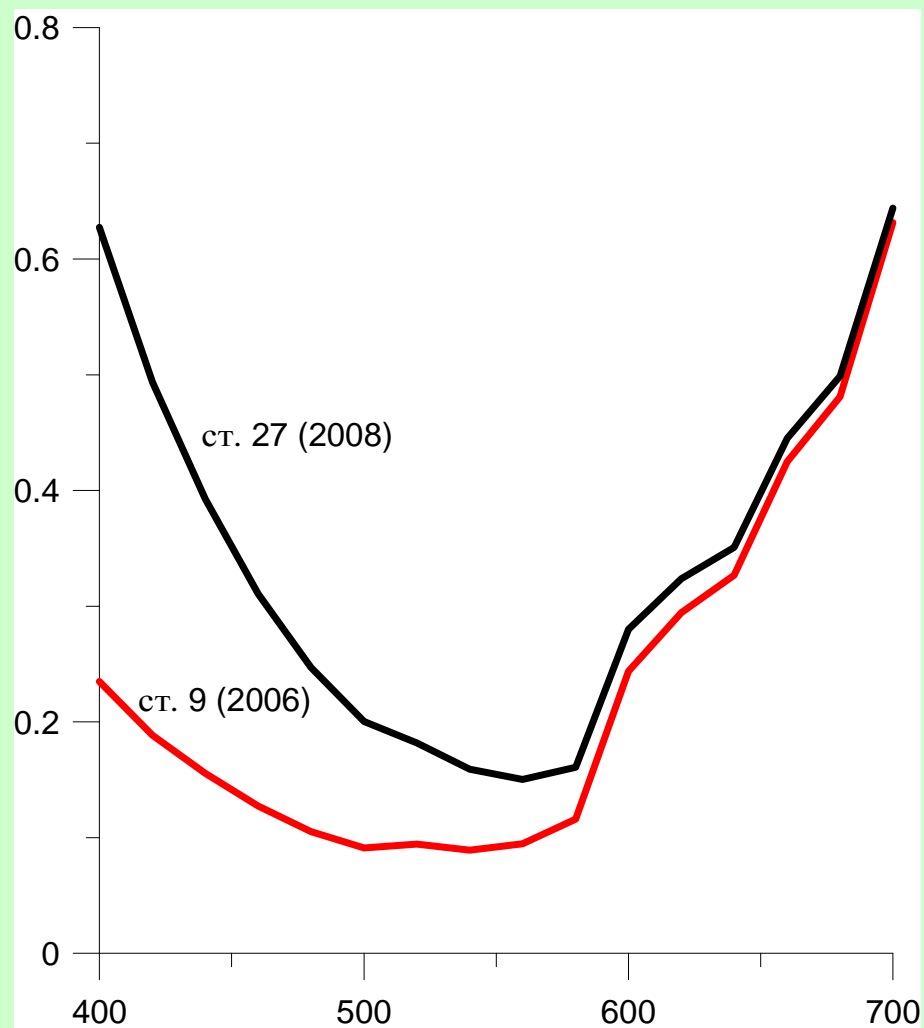
Станция 9, 31 июля 2006, H=10.5 м



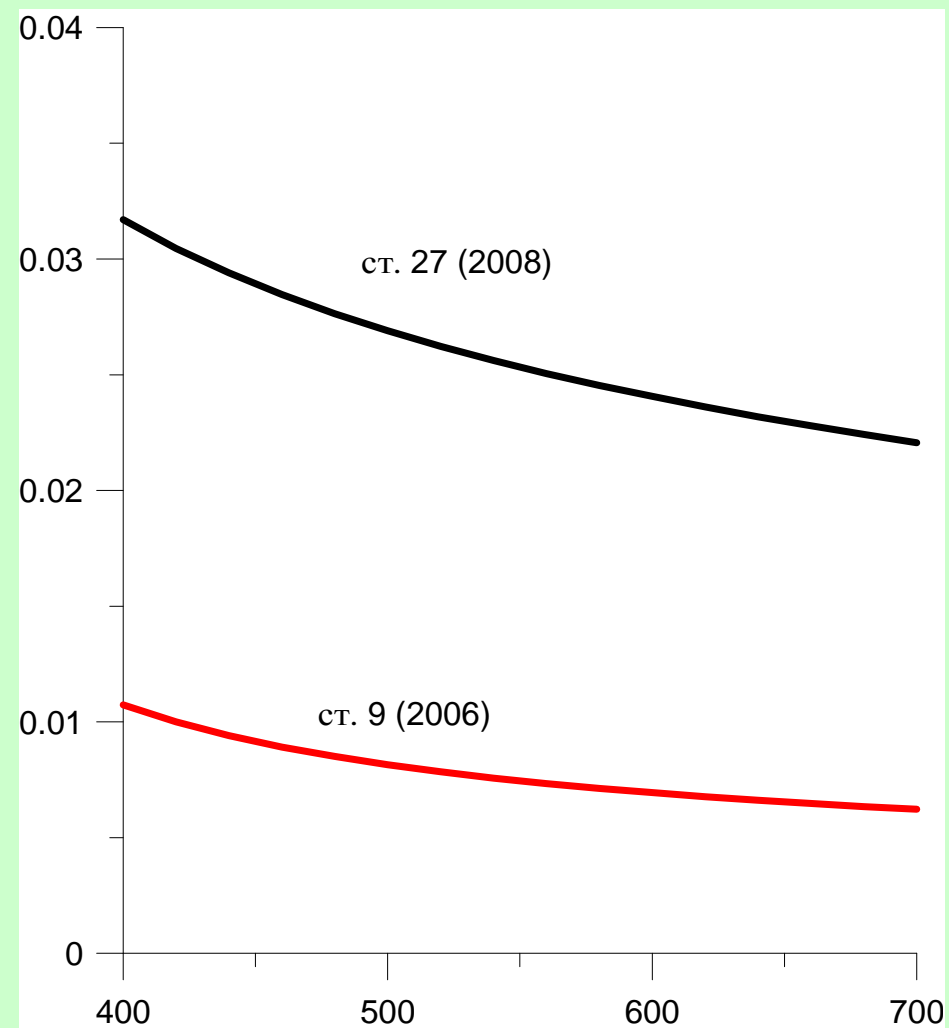
Станция 27, 3 августа 2008, H=6.5 м

Восстановленные оптические свойства морской воды

Спектральный показатель
поглощения морской воды, m^{-1}



Спектральный показатель
рассеяния назад морской воды, m^{-1}



Баланс на поверхности моря

$$E_d(0^-) - E_u(0^-) = E_d(0^+) - E_{\text{ref}} - E_w$$

- $E_d(0^-)$ - облученность сверху непосредственно под поверхностью воды
- $E_u(0^-)$ - облученность снизу непосредственно под поверхностью воды
- $E_d(0^+)$ - облученность сверху над поверхностью воды
- E_{ref} и E_w - облученности снизу непосредственно над поверхностью воды, создаваемые, соответственно отраженным от поверхности и вышедшим из водной толщи потоками излучения.

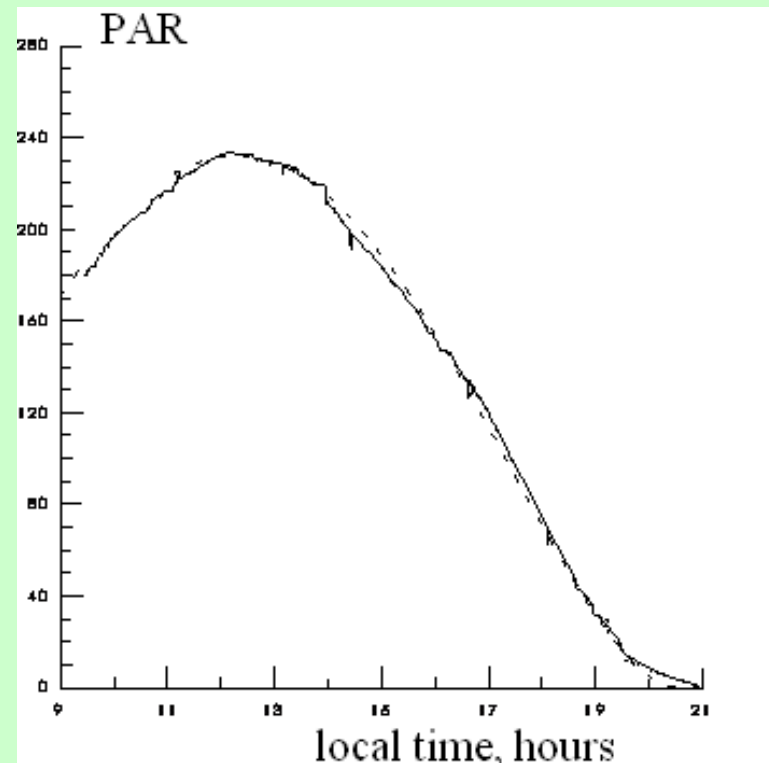
$$E_d(\lambda, 0^+) = F_0(\lambda) \cos \theta t_r(\lambda) t_a(\lambda) t_{cl}(\lambda) t_{oz}(\lambda)$$

$F_0(\lambda)$ - спектральная величина солнечной постоянной

θ - зенитный угол солнца

$t_r(\lambda)$, $t_a(\lambda)$, $t_{cl}(\lambda)$, $t_{oz}(\lambda)$ - диффузное пропускание солнечного излучения обусловленное соответственно релеевским рассеянием, аэрозолем, облаками и озоновым слоем.

пример расчета изменения ФАР на поверхности моря по данным SeaWiFS в течение дня в сравнении с данными измерений с помощью контрольного фотометра в Баренцевом море, август 1998 (Ершова и др. 2001).



Облученности, создаваемые отраженным от поверхности и вышедшим из водной толщи потоками излучения.

$$E_{\text{ref}} = (1-p) \cdot [r_{\text{diff}} \cdot E_{\text{diff}} + r_{\text{dir}} \cdot E_{\text{dir}}] + p \cdot r_{\text{wcap}} \cdot (E_{\text{dir}} + E_{\text{diff}}),$$

где r_{diff} , r_{dir} коэффициенты отражения для прямой и диффузной компонент нисходящего излучения E_{dir} и E_{dif} , r_{wcap} коэффициент отражения пены, а p доля поверхности занятая пеной. r_{dir} , r_{dif} , r_{wcap} и p зависят от скорости ветра.

В предположении изотропности:

$$E_w(\lambda) = \pi L_w(\lambda),$$

где $L_w(\lambda)$ яркость вышедшего из воды излучения.

Величина $L_w(\lambda)$ рассчитывается в зависимости от высоты Солнца и диффузного пропускания атмосферы для солнечного излучения $t(\lambda)$:

$$L_w(\lambda) = L_{\text{wN}}(\lambda) t(\lambda) \cos\theta,$$

где θ – зенитный угол Солнца, L_{wN} – нормализованная яркость, которая находится через $\rho_w(\lambda)$:

$$L_{\text{wN}}(\lambda) = F_0(\lambda) 0.165 \rho_w(\lambda) / (1 - 0.497 \rho_w(\lambda))$$

Облученности сверху и снизу непосредственно под поверхностью воды

$$E_d(0^-) = E_u(0^-) R(0^-),$$

где $R(0^-)$ коэффициент диффузного отражения водной толщи.

С учетом отражения ото дна:

$$R(0^-) = R_\infty + [R_B - R_\infty] \exp(-2 K_d H),$$

где R_∞ коэффициент диффузного отражения водной толщи для бесконечно глубокого океана, а $R_B(\lambda) = \rho_B(\lambda)$ - коэффициент отражения от дна.

Величины R_∞ рассчитываются через ρ_∞ :

$$R_\infty(\lambda) = \rho_\infty \cdot Q/\pi,$$

значения Q для зависит от длины волны, высоты Солнца и концентрации хлорофилла (Morel, Mueller, 2003).

Из уравнения

$$E_d(0^-) - E_u(0^-) = E_d(0^+) - E_{\text{ref}} - E_w$$

находим

$$E_d(0^-) = (E_d(0^+) - E_{\text{ref}} - E_w)/(1 - R(0^-))$$

Расчеты нисходящей $E_d(z)$ и восходящей $E_u(z)$ в зависимости от глубины z

$$E_d(z) = E_d(0^-) \exp [-K_d z]$$

$$E_u(z) = R_\infty E_d(z) + (R_B - R_\infty) E_d(z) e^{-2 K_d (H-z)}$$

Объемное поглощение в водной толще

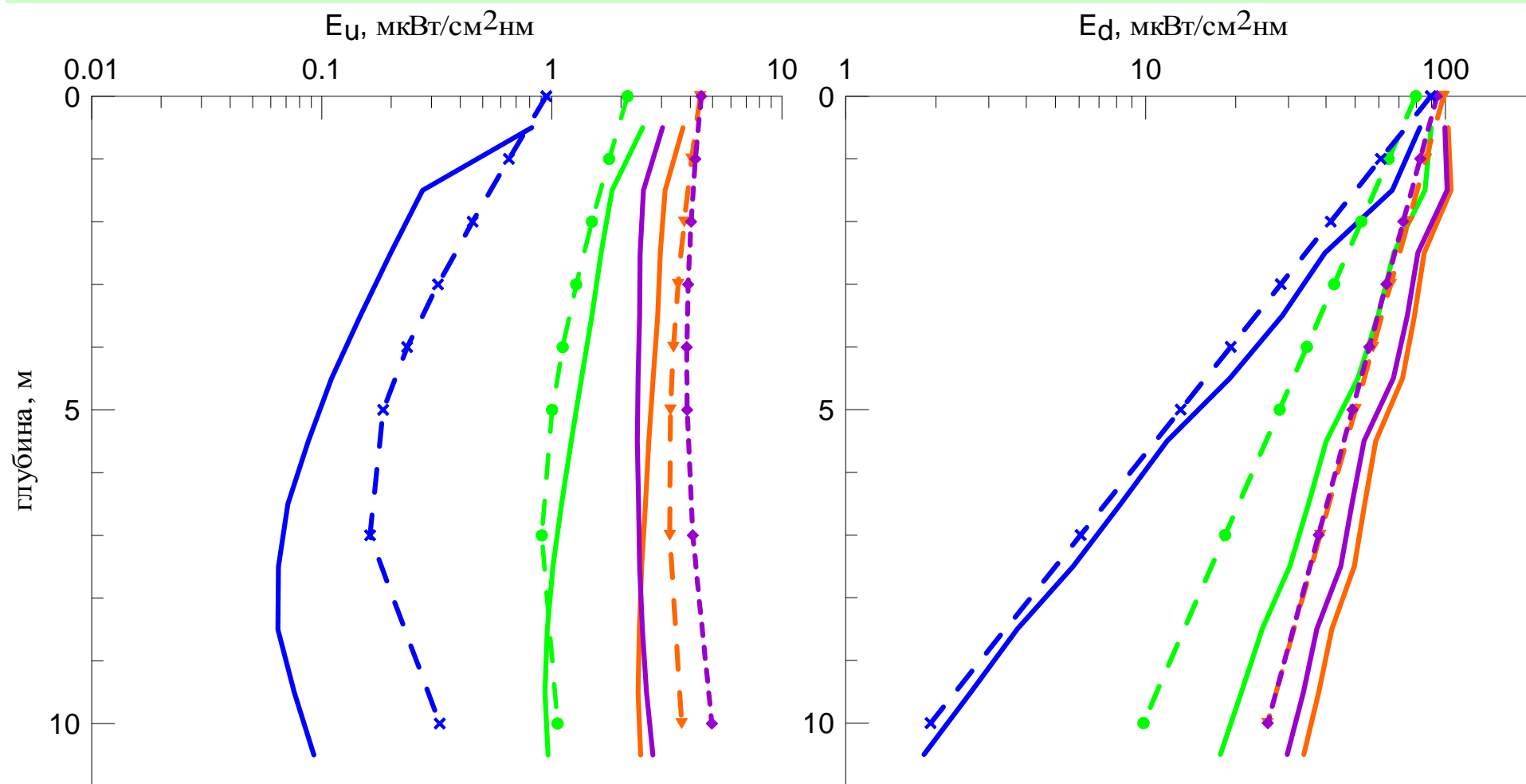
исходя из баланса лучистой энергии в рассматриваемом слое

$$\Delta z = z_2 - z_1$$

$$E_{\text{abs}}(\Delta z) = E_d(z_1) - E_d(z_2) + E_u(z_2) - E_u(z_1),$$

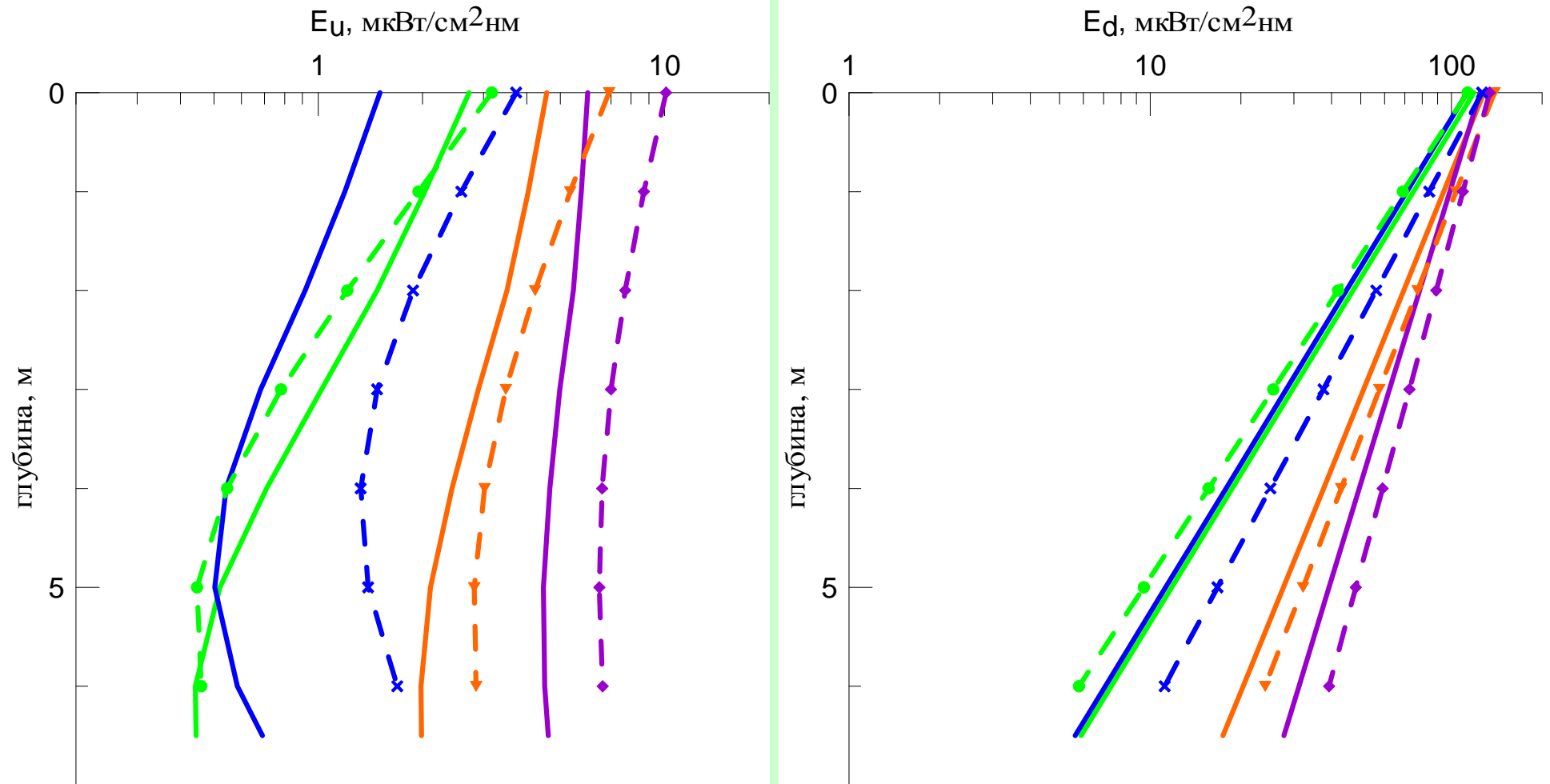
где $E_d(z_1)$, $E_d(z_2)$ – величины подводной облученности сверху на горизонтах z_1 и z_2 ; $E_u(z_2)$, $E_u(z_1)$ – величины облученности снизу на этих горизонтах.

Станция 9, 31 июля 2006, H=10.5 м



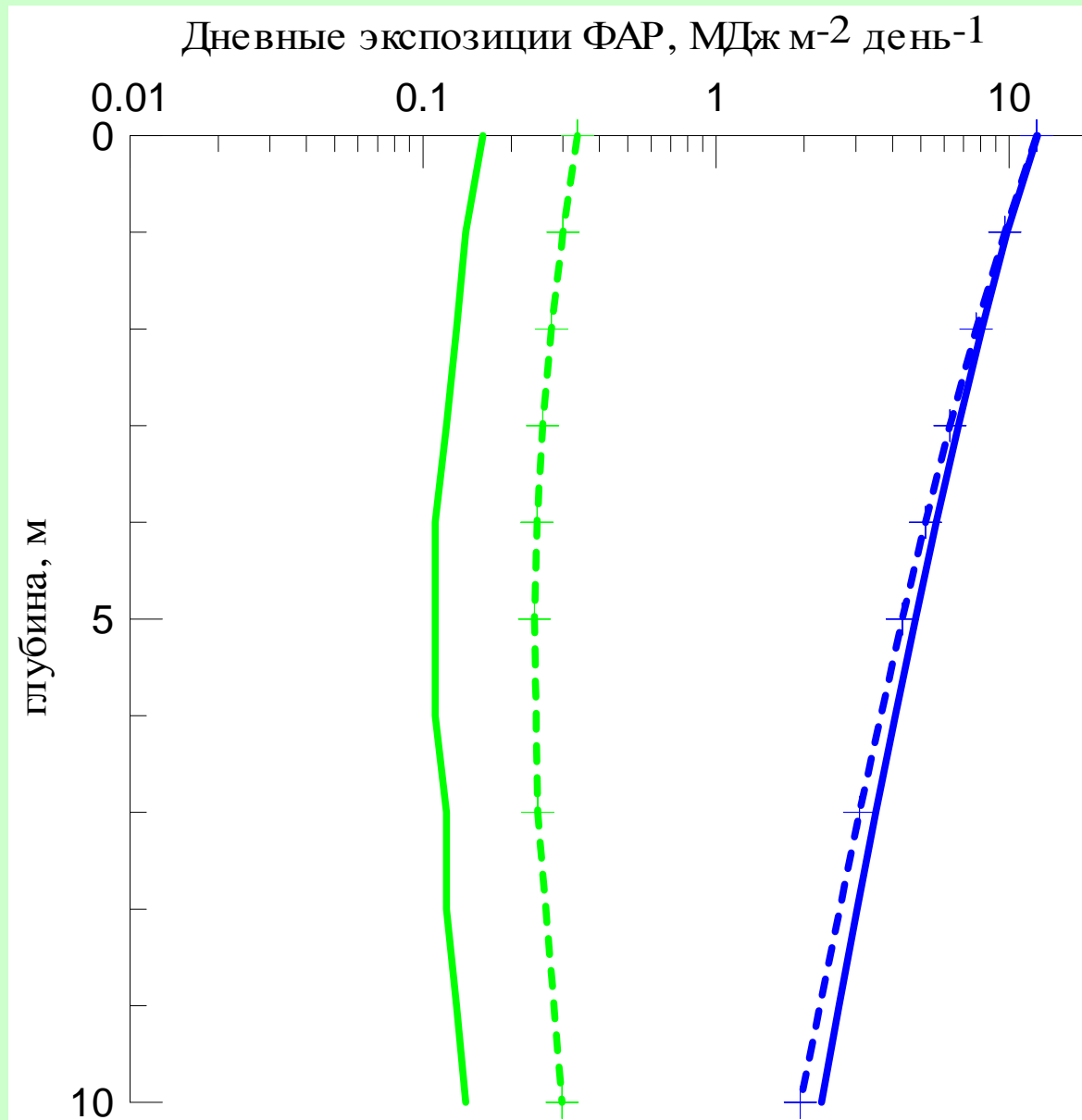
Сравнение рассчитанных по данным SeaWiFS (пунктирные линии) и измеренных (сплошные) спектральных мгновенных величин $E_d(z, \lambda)$ и $E_u(z, \lambda)$ для $\lambda=443$ нм зелёным цветом, 490 нм – оранжевым, 555 нм – фиолетовым и 626 нм – синим.

Станция 27, 3 августа 2008, H=6.5 м



Сравнение рассчитанных по данным MODIS (пунктирные линии) и измеренных (сплошные) спектральных мгновенных величин $E_d(z, \lambda)$ и $E_u(z, \lambda)$ для $\lambda=443$ нм зелёным цветом, 490 нм – оранжевым, 555 нм – фиолетовым и 626 нм – синим.

Дневные экспозиции ФАР



$$\Phi AP = \int_{400}^{700} E(\lambda) d\lambda$$

Дневные экспозиции ФАР, рассчитанные по данным SeaWiFS (пунктирные линии) и по данным измерений (сплошные) для нисходящего потока излучения обозначены синим цветом, для восходящего – зелёным. Станция 9, 31 июля 2006, Н=10.5 м

Объемное поглощение в в разных слоях

$$\Phi AP_{abs}(\Delta z) = \Phi AP_d(z_1) - \Phi AP_d(z_2) + \Phi AP_u(z_2) - \Phi AP_u(z_1)$$

СЛОЙ, М	Станция 8, Н=12 м			Станция 9, Н=10.5 м		
	по результатам измерений	по спутниковым данным	различия, %	по результатам измерений	по спутниковым данным	различия, %
0 - 1	2.82	2.48	-12.2	2.65	2.70	1.9
1 - 2	1.74	1.77	1.9	1.76	1.93	9.5
2 - 3	1.25	1.32	5.6	1.36	1.43	4.8
3 - 4	0.92	1.02	10.3	1.05	1.09	2.7
4 - 5	0.72	0.80	11.5	0.87	0.85	-1.9
5 - 7	1.00	1.19	18.7	1.28	1.24	2.8
7 - 10	0.90	1.16	29.0	1.25	1.20	4.0

Объемное поглощение ФАР в разных слоях в процентах от величины ФАР на поверхности

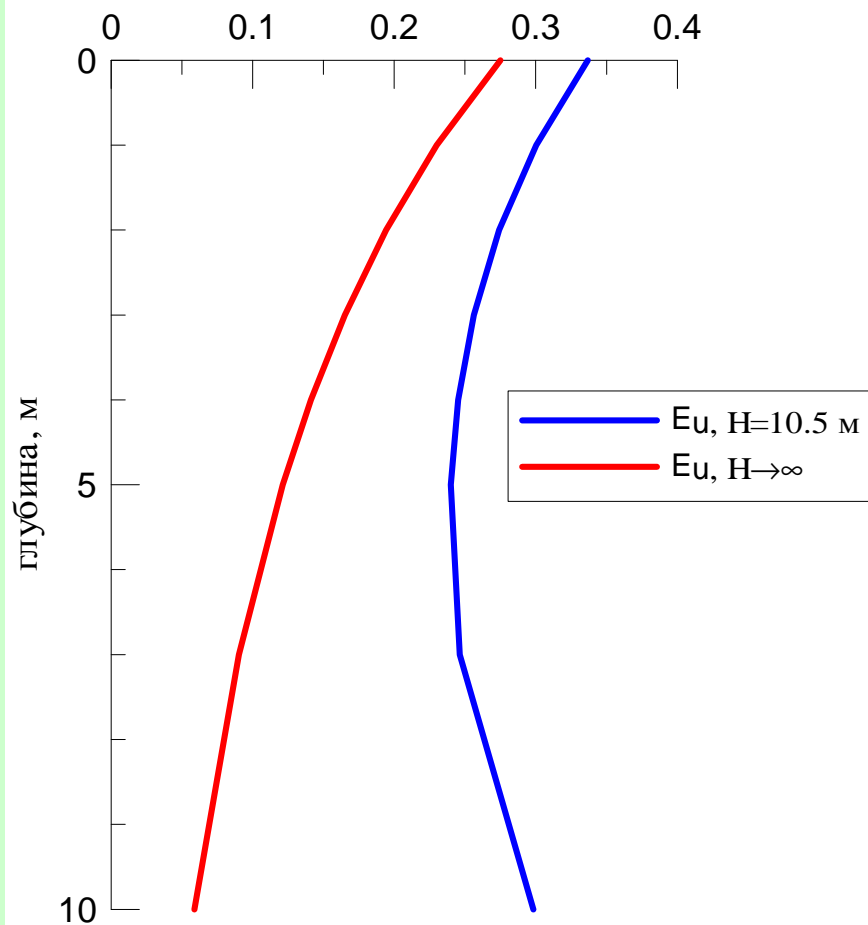
слой, м	Станция 2, 2006, H=60.5 м	Станция 8, 2006, H=12 м	Станция 9, 2006, H=10.5 м	Станция 27, 2008, H=6.5 м
0 - 1	20.0	20.9	22.4	33.0
1 - 2	14.4	15.0	16.0	21.0
2 - 3	10.7	11.2	11.8	13.8
3 - 4	8.3	8.6	9.0	9.4
4 - 5	6.6	6.8	7.1	6.6
5 - 7	9.8	10.0	10.3	
7 - 10	9.6	9.8	9.9	

Влияние отражения ото дна

Влияние отражения ото дна можно наглядно продемонстрировать путем расчета в предположении $H \rightarrow \infty$.

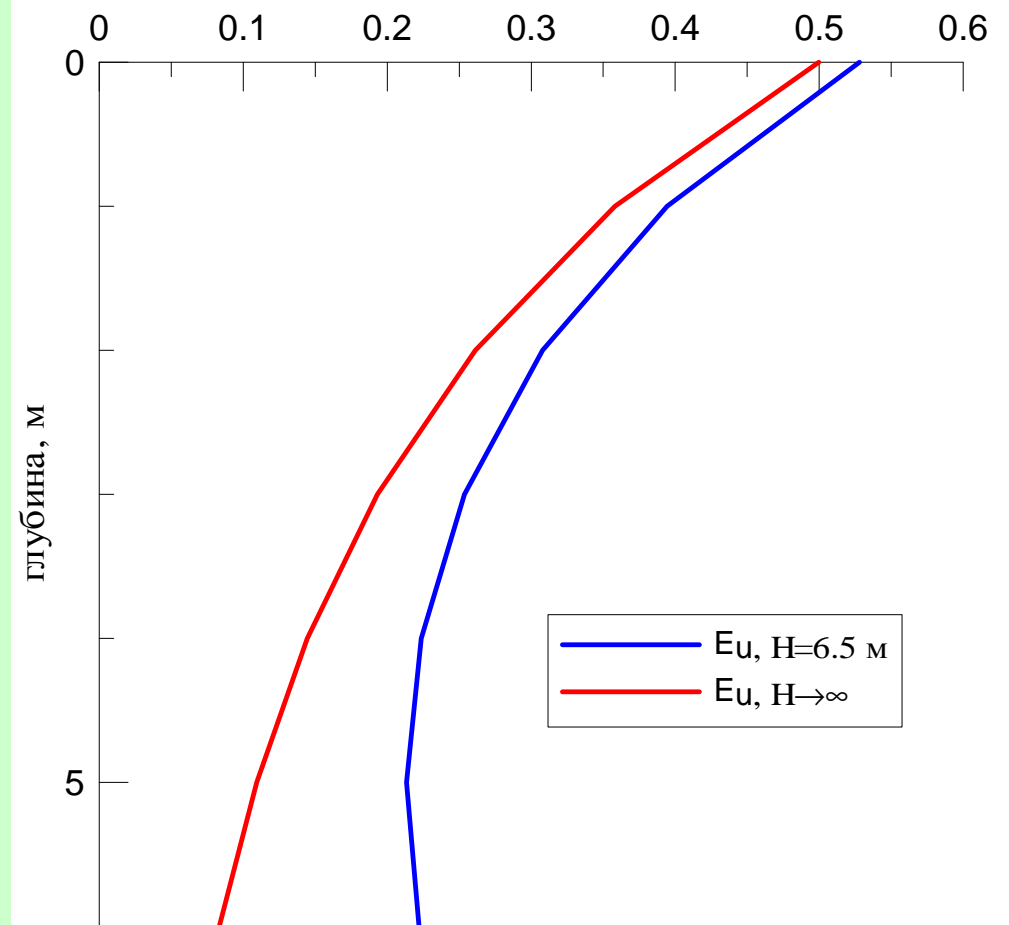
Станция 9, 2006

Дневные экспозиции ФАР, МДж м⁻² день⁻¹



Станция 27, 2008

Дневные экспозиции ФАР, МДж м⁻² день⁻¹



Заключение

- Разработан алгоритм для оценки баланса солнечного излучения (ФАР) в мелководном море по спутниковым данным о цвете вод
- Но требуется его дальнейшее усовершенствование, особенно это касается уменьшения ошибок атмосферной коррекции и создания корректной региональной модели оптических свойств морской воды, а также необходимо дополнительное исследование спектрального коэффициента отражения от дна
- Для этого требуется проведение дальнейших натурных комплексных исследований в сочетании с одновременными спутниковыми наблюдениями.

Спасибо за внимание

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта
РФФИ № 07-05-00799 и Программы фундаментальных
исследований №17 Президиума РАН